

Ⅱ-397 住宅用太陽光発電システム群の協調制御による

citation and similar papers at core.ac.uk

brought to

provided by Meiji Repository (Meiji University A)

川崎 章司^{*1}, 小山 真明^{*2}

Voltage Control Method in Distribution System by Cooperative Control of Residential PV Systems

Shoji Kawasaki^{*1}, Masaaki Koyama^{*2}

Abstract

Recently, the number of system interconnection of the renewable energy such as photo voltaic generation (PV) system has been increasing drastically. The distribution system with the distributed generation must be operated keeping reliability of power supply and power quality. In this study, the authors propose a cooperative voltage control method of the distribution system by the power factor control of residential PV systems. In order to verify the validity of the proposal method, the numerical calculations are carried out by using an analytical model of distribution system which interconnected PV systems.

Key Words: Numerical Analysis, Simulation, Photovoltaic Generator, Power Conditioner System, Power Quality, Voltage Control

1. はじめに

環境負荷軽減や石油代替効果などの期待により、太陽光発電（以下、PV）システムの連系台数は、今後ますます増加することが予想されており、政府によるPV導入目標量として、2008年に策定された低炭素社会づくり行動計画¹⁾によると、2020年に現状の10倍、2030年に40倍（5,300万kW）となっている。このような自然エネルギー利用型分散型電源の系統連系実績数の増加に伴い、分散型電源の系統連系に対する課題等が議論されている²⁾。PVシステムは、天候に大きく左右されて急峻な出力変動を起こすため、PVシステムが連系された配電系統ではその影響により地点電圧も急峻に変動し、場合によっては、電圧の適正範囲からの逸脱や電圧不平衡を引き起こすことが懸念される。

配電系統には、地点電圧の変動に対して適正範囲内に収めるために負荷時タップ切り替え変圧器（以下、LRT：Load Ratio control Transformer）や自動電圧調整器（以下、SVR：Step Voltage Regulator）などが設置されているが、機械的スイッチングや機器の長寿命化を考慮した動作設定により、瞬時に、また頻繁に電圧を制御するこ

とができないため、LRTやSVRによる電圧制御ではPVシステムや負荷などによる急峻な電圧変動があった場合には、系統の地点電圧が適正電圧範囲を逸脱してしまう恐れがある。また、PVシステムには、力率制御により無効電力を供給して系統連系点の電圧上昇を抑制する機能があり、これに関する研究がなされている^{3)~5)}。しかし、現状の制御方法では、系統に連系されている複数台のPVシステムはそれぞれ個別に連系地点の電圧を監視し、電圧が適正範囲を逸脱した場合その地点のみを個別に力率制御を行う。そのため、力率制御によりPVシステムの連系地点の電圧逸脱が解消されても、連系地点以外では電圧逸脱が解消されない場合が考えられる。これに対し筆者らは、PVシステムが連系されていない地点の電圧逸脱も考慮したPVシステムの制御方式について検討し、これまで、系統に連系された複数台のPVシステムの力率制御によりすべての地点の電圧逸脱を解消する手法を提案してきた⁶⁾。文献(6)では、複数台のPVシステムを簡易的に一括して均等に制御することで電圧逸脱を解消でき、付随して系統の電圧不平衡も改善できるという結果が得られた。

本研究では、更なる電圧制御効果の向上と系統の電圧不平衡の積極的な改善を目指し、住宅用PVシステム群をグループに分けて協調制御する系統電圧制御手法を提

^{*1} 明治大学 理工学部 電気電子生命学科

^{*2} 明治大学大学院 理工学研究科 電気工学専攻

案する。提案する電圧制御法は、低圧系統のPVシステムの連系地点の電圧に力率制御の不感帯を設けることで、電圧の適正範囲逸脱を防ぎつつLRTやSVRでは対応できない急峻な電圧変動をPVシステム群の力率制御により制御するものである。本制御法により、LRTやSVRのタップ切り替え回数の低減による機器の長寿命化や、PVシステムによる自然エネルギーの有効利用による環境負荷軽減効果、電圧不平衡改善効果などが期待できる。また、提案手法の有用性について検証するため、PVシステム群の連系による連系地点近傍での急峻な電圧変動により地点電圧が適正電圧範囲を逸脱してしまうことを想定し、PVシステムが多数台連系された配電システムモデルを用いて数値計算を行い、PVシステム群の力率制御の協調制御による電圧制御効果について従来の制御法との比較解析を行う。

2. 提案手法の概要

本論文で提案する手法は、複数台のPVシステム群の協調制御により系統の電圧逸脱の抑制を行い、加えて系統の電圧不平衡を改善し系統全体で電力品質を向上させるというものである。具体的には、配電系統に設置されている複数のセンサ付開閉器のセンサ情報とPV連系点電圧の情報を中央制御システムに集約し、制御指令によりPVシステム群の連系位相を変化させて（力率制御）、無効電力を系統に注入して系統電圧を変化させる。図-1に提案手法の概念図を示す。本論文では、電圧制御効果の向上と系統の電圧不平衡の積極的な改善を目的として三つの手法を提案し、比較検証を行う。

2.1 PVシステム群の力率制御

PVシステム群の力率制御により、LRTやSVRでは対応することのできない急峻な電圧変動による適正電圧範囲（100V受電： $101 \pm 6[V]$ ，200V受電： $202 \pm 20[V]$ ）からの逸脱を抑制し、配電系統の全ての地点で適正電圧範囲内に収まるように制御を行う（(1)式）。また、力率は系統連系規定⁷⁾により、受電点の力率は原則85%以上と定められているため、PVシステム群の力率制御指令の範囲は、0.85～1.00（進相）とする（(2)式）。

$$V_{kL} \leq V_{kabt} \leq V_{kH} \quad (1)$$

$$0.85 \leq \cos \theta_{PVabt} \leq 1.00 \quad (2)$$

ただし、 V_{kabt} ：時間断面 $t[s]$ における k 地点の $a-b(U-V, V-W, W-U)$ 相間の電圧 $[V]$ ， V_{kH} ， V_{kL} ： V_{kabt} の適正電圧の上限値および下限値 $[V]$ ， $\cos \theta_{PVabt}$ ： $a-b$ 相

に連系されているPVシステム $i(i=1 \sim N)$ の時間断面 $t[s]$ における力率。

以下に、提案する制御手法①～③と、制御効果の比較のため用いた従来手法について説明する。

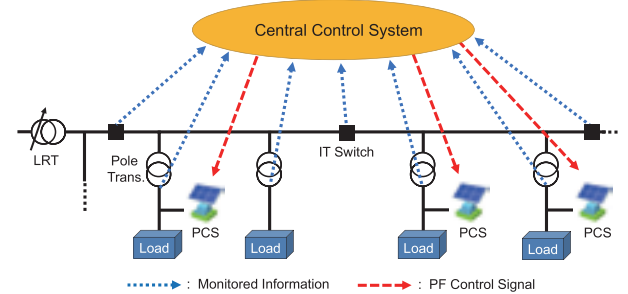


図-1 提案手法の概念図

2.1.1 従来手法（個別制御）

系統に連系されたPVシステムが個別に連系地点電圧の監視を行う。PVシステムによる制御適正電圧として、上述の適正電圧範囲よりも狭い範囲の不感帯を設け、低圧系統のPV連系地点の電圧が不感帯の上限値または下限値を逸脱した場合、逸脱した地点のPVシステムのみ個別に力率制御を行う（図-2参照）。

2.1.2 提案手法①（逸脱相間一括制御）

PV連系地点の電圧を集中して監視。電圧が不感帯を逸脱した相間に連系されている全てのPVシステムに均等に力率制御を行う（図-3参照）。

個別制御と同様に不感帯を設け、低圧系統のPV連系地点の電圧が不感帯の上限値または下限値を逸脱した場合、電圧逸脱した相間に連系されている全てのPVシステム群を一括して均等に力率制御を行う（(3)、(4)式）。そして、不感帯内に収まった場合は、有効電力出力を上げるため無効電力出力を抑えて力率を元の状態に戻すが、このとき急激に戻すと電圧が不安定に変動する恐れがあるため、電圧の変化を監視しながら徐々に力率を改善させる。

$$V_{PVabt} > V_{PV_H}^* \text{ のとき}$$

$$\cos \theta_{PVabt}^* = \cos \theta_{PVabt} - \Delta PF \quad (3)$$

$$V_{PVabt} < V_{PV_L}^* \text{ のとき}$$

$$\cos \theta_{PVabt}^* = \cos \theta_{PVabt} + \Delta PF \quad (4)$$

ただし、 V_{PVabt} ：時間断面 $t[s]$ における $a-b$ 相間に連系されているPVシステム $i(i=1 \sim N)$ の連系地点電圧 $[V]$ ， $V_{PV_H}^*$ ， $V_{PV_L}^*$ ：PVシステムの不感帯の上限値および下限値（目標電圧） $[V]$ ， $\cos \theta_{PVabt}^*$ ： $a-b$ 相間に連系

されている PV システム群の時間断面 $t[s]$ における力率制御指令, $\cos \theta_{PVabt} : a-b$ 相間に連系されている PV システム群の時間断面 $t[s]$ における力率, ΔPF : 力率制御幅 (制御幅の具体的な設定については 3.1 節で述べる)。

2.1.3 提案手法②（逸脱最大ノード一括制御）

PV 連系地点の電圧を集中して監視。電圧逸脱量が最大のノードに連系されているすべての PV システムに力率制御を行う。電圧逸脱を適正範囲内に抑制できない場合は、フィードの両端に向けて順々に制御を広げていく(図-4 参照)。

個別制御と同様に不感帯を設け、低圧系統の PV 連系地点の電圧が不感帯の上限値または下限値を逸脱した場合、各ノードの電圧の適正範囲からの逸脱量を計算し、逸脱量最大のノード n を決定する ((5), (8) 式)。ノード n に連系されている PV システム群に力率制御を行う ((6), (9) 式)。その後、フィーダの両端のノード ($n \pm j$) に向けて順々に制御を広げる ((7), (10) 式)。ここで、 $j=1, 2, \dots$ 、ノード番号 ($n \pm j$) は 1 以上の整数とする。

 $V_{PVnt} > V_{PVH}^*$ のとき

$$\Delta V_{\max} = \max(V_{PVnt} - V_{PVH}^*) \dots\dots\dots (5)$$

$$\cos \theta_{PVnt}^* = \cos \theta_{PVnt} - \Delta PF \dots\dots\dots (6)$$

$$\cos \theta_{PV(n \pm i)t}^* = \cos \theta_{PV(n \pm i)t} - \Delta PF \dots\dots\dots (7)$$

 $V_{PVnt} < V_{PV-L}^*$ のとき

$$\Delta V_{\max} = \max(V_{PV_L}^* - V_{PVnt}) \dots\dots\dots (8)$$

$$\cos \theta_{PVnt}^* = \cos \theta_{PVnt} + \Delta PF \dots\dots\dots (9)$$

$$\cos \theta_{PV(n+i)t}^* = \cos \theta_{PV(n+i)t} + \Delta PF \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 V_{PVnt} : PV システムが連系されているノード n の時間断面 $t[s]$ における地点電圧[V], ΔV_{\max} : 電圧の不感帯逸脱量最大値[V], $\cos \theta_{PVnt}^*$: ノード n に連系されている PV システム群の時間断面 $t[s]$ における力率制御指令, $\cos \theta_{PVnt}$: ノード n に連系されている PV システム群の時間断面 $t[s]$ における力率。

2.1.4 提案手法③（逸脱最大ノード相間制御）

PV 連系地点の電圧を集中して監視。電圧逸脱量が最大のノードの中で、電圧が最大の相間に連系されている PV システムのみを力率制御。電圧逸脱を適正範囲内に抑制できない場合は、フィーダの両端に向けて順々に制

御を広げていく (図-5 参照)。

個別制御と同様に不感帯を設け、低圧系統の PV 連系地点の電圧が不感帯の上限値または下限値を逸脱した場合、各ノードの電圧の適正範囲からの逸脱量を計算し、逸脱量最大のノード n と相間 ab (UV または VW または WU) を決定する ((11), (14) 式)。ノード n の相間 ab に連系されている PV システムに力率制御を行う ((12), (15) 式)。その後、フィーダの両端のノード ($n \pm j$) に向けて順々に制御を広げる ((13), (16) 式)。

 $V_{PVnabt} > V_{PVH}^*$ のとき

$$\Delta V_{\max} = \max(V_{PVnabt} - V_{PVH}^*) \dots \dots \dots (11)$$

$$\cos \theta_{PVnabt}^* = \cos \theta_{PVnabt} - \Delta PF \dots\dots\dots (12)$$

$$\cos \theta_{PV(n \pm i)abt}^* = \cos \theta_{PV(n \pm i)abt} - \Delta PF \dots \dots \dots (13)$$

 $V_{PVnight} < V_{PV-L}^*$ のとき

$$\Delta V_{\max} = \max(V_{PV-L}^* - V_{PVnabt}) \dots\dots\dots (14)$$

$$\cos \theta_{PVnabt}^* = \cos \theta_{PVnabt} + \Delta PF \dots\dots\dots (15)$$

$$\cos \theta_{PV(n \pm j)abt}^* = \cos \theta_{PV(n \pm j)abt} + \Delta PF \dots \dots \dots (16)$$

ただし、 V_{PVnabt} : PV システムが連系されているノード n の a - b 相間の時間断面 $t[s]$ における地点電圧 [V],
 $\cos \theta_{PVnabt}^*$: ノード n の a - b 相間に連系されている PV システムの時間断面 $t[s]$ における力率制御指令,
 $\cos \theta_{PVnabt}$: ノード n の a - b 相間に連系されている PV システムの時間断面 $t[s]$ における力率。

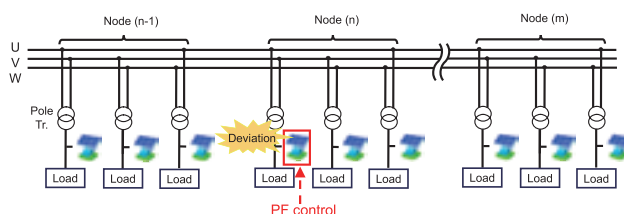
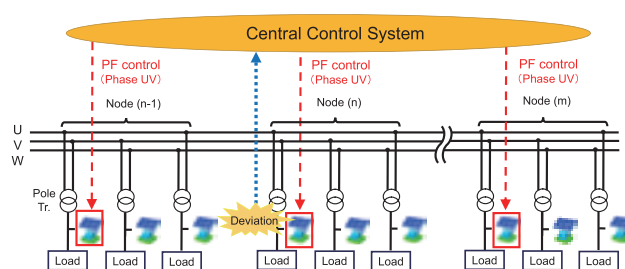


図-2 従来手法（個別制御）



图一3 提案手法①（逸脱相間一括制御）

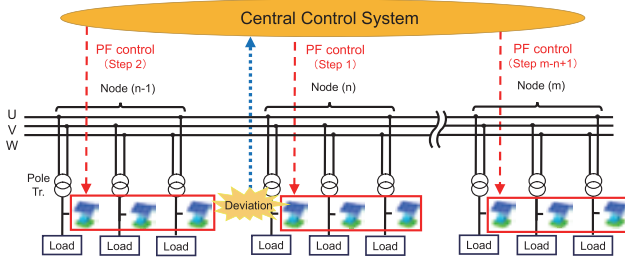


図-4 提案手法② (逸脱最大ノード一括制御)

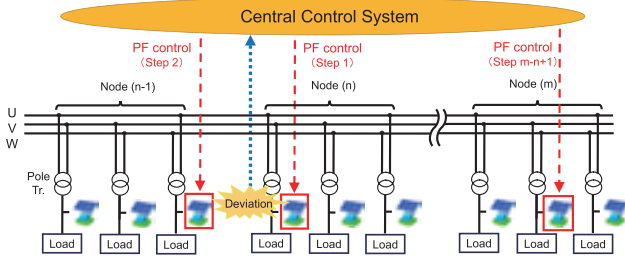


図-5 提案手法③ (逸脱最大ノード相間制御)

2.2 LRT のタップ制御

LRT のタップ制御による電圧制御には、LDC (Line Drop Compensator) 方式とプログラム制御装置による方式があるが、本研究では、LRT と PV システムとの制御分担を考慮しているため、リアルタイムで制御可能な LDC 方式を用いる。LDC 方式は、LRT 設置地点電圧から制御目標地点への電圧降下を算出して制御目標地点電圧を推定し、制御目標地点における不感帯逸脱量を算出し、LRT のタップを切り替えることにより電圧を制御するものである。具体的には、LRT 設置地点の電圧、通過電流、およびインピーダンス整定値から制御目標地点の電圧を推定し、推定電圧が目標電圧 V_{CP}^* (LRT 不感帯幅: 2ε , $\varepsilon > 0$) の不感帯内に収まるように電圧を制御する。LRT のタップ位置は、(17) ~ (21) 式で求まる不感帯逸脱積分量 S_d が電圧上昇に対する閾値 S_h を上回る場合には 1 タップ下げ、電圧下降に対する閾値 S_l を下回る場合には 1 タップ上げる ((22), (23) 式)。なお、タップを変更した場合は、 S_d をリセットする。(19) 式における $\text{sign}(\Delta V)$ は、 ΔV の符号を示す関数である。

$$V_{CP} = V_{LRT} - Z I_{LRT} \quad (17)$$

$$\Delta V = V_{CP} - V_{CP}^* \quad (18)$$

$$S_d = \int \text{sign}(\Delta V) \cdot (|\Delta V| - \varepsilon) dt \quad (19)$$

$V_{CP} > V_{CP}^*$ のとき

$$S_d \geq 0 \quad (20)$$

$V_{CP} < V_{CP}^*$ のとき

$$S_d \leq 0 \quad (21)$$

$S_d > S_h$ のとき

$$\text{TapPosition } n = \text{TapPosition } n - 1 \quad (22)$$

$S_d < S_l$ のとき

$$\text{TapPosition } n = \text{TapPosition } n + 1 \quad (23)$$

ただし、 V_{CP} : 制御目標地点の推定電圧[V], V_{LRT} : LRT 設置地点電圧[V], I_{LRT} : LRT 設置地点の通過電流[A], Z : インピーダンス整定値[Ω], V_{CP}^* : 制御目標地点の目標電圧[V], ΔV : 制御目標地点の推定電圧と目標電圧との偏差[V], TapPosition : LRT のタップ位置。

2.3 PV システム群と LRT による協調型電圧制御

LRT は機械的スイッチングや長寿命化を考慮した動作設計のため、一般的に制御に数十[s]~数[min]の時間を要する。一方、PV システムの力率制御は、PV システム内の連系インバータにより行うので、数十[ms]~数百[ms]の高速制御が可能である。これらの異なる応答特性を持つ電圧制御機器を有効に活用することによって、PV システム群が大量に導入された配電系統においても適正な電圧制御が可能となると考えられる。しかし、LRT と PV システムとの制御応答速度の違いは、電圧制御の安定性を低下させる恐れがある。また、LRT による LDC 方式の電圧制御は、一相の地点電圧のみを推定して、送出し電圧を決定し制御しているため、系統の電圧不平衡が大きい場合や単相 PV の出力変動が大きくなった場合などに、LRT により推定されている相以外で電圧逸脱が生じる可能性がある。一方、PV システムの従来手法である個々での力率制御では、有効電力出力の大幅な抑制や PV システム連系地点以外で適正電圧範囲からの逸脱が起こる可能性がある。

そこで、提案手法では、応答速度の違いについて LRT と PV システム群の力率制御の双方に不感帯を設け、PV システムによる力率制御の不感帯を LRT よりも大きく設定することにより、緩やかで大きな電圧変動に対しては LRT に対応させ、LRT では対応できない急峻な電圧変動のみを PV システム群の力率制御により対応させる。また、LRT では対応できない相での電圧逸脱は、今後配電系統に広く大量に連系されていくことが予想される住宅用の単相 PV システム群により力率制御を行う

ことで、適正電圧範囲からの逸脱抑制のみだけでなく、系統の電圧不平衡も改善でき、電力品質の向上をもたらすことが期待できる。

3. 数値計算例

提案手法の妥当性を検証するため、PV システムの急峻な出力変動により配電系統の地点電圧が適正電圧範囲を逸脱することを想定し、3 分割 3 連系 2 フィーダモデルを用いて数値計算を行った。

3.1 数値計算条件

図-6 に解析に用いた配電系統モデルを示す。フィーダ 1 は、配電線路（全長 3.0km）、負荷 8 台、開閉器 6 個、柱上変圧器 8 台、および PV システム 9 台からなる。フィーダ 2 は、配電線路（全長 2.0km）、負荷 6 台、開閉器 5 個、柱上変圧器 6 台、および PV システム 9 台からなる。なお、フィーダ 1 およびフィーダ 2 における負荷は、電灯および低圧動力負荷を想定した住宅負荷とし、柱上変圧器を介した 2 次側に 100V、200V 負荷として接続し、フィーダ 1 およびフィーダ 2 の総負荷容量を 2MW および 1.6MW とし、実測値に基づく日負荷曲線に、 $\pm 5\%$ 、6 秒周期の微小な負荷変動を与えた。送り出し電圧は 6,900V とし、PV システム群の連系により 2 次側の適正電圧範囲（ $V_{Upper}=1.07\text{p.u.}$ （107V）、 $V_{Lower}=0.95\text{p.u.}$ （95V））を逸脱することを想定した。連系した PV システム群は、住宅用 PV システムを想定して単相 PV システムとした。フィーダ 1 には総負荷容量の 50% の PV システム群をフィーダ末端側に集中連系し、フィーダ 2 には総負荷容量の 50% の PV システム群をフィーダに分散して連系した。また、PV システムの不感帯の上限値および下限値（目標電圧）を、 $V_{PV_H}^*=1.06\text{p.u.}$ 、 $V_{PV_L}^*=0.95\text{p.u.}$ とした。各 PV システムの力率制御は (3)、(4) 式、(6)、(7) 式、および (9)、(10) 式に従って行い、今回 ΔPF は 0.01 とした。LRT の各設定値は、タップ数を 9 タップ、1 タップ変更時の電圧調整量を 60V とし、 $V_{CP}^*=6,650\text{V}$ 、 $\varepsilon=50\text{V}$ 、 $S_h=500$ 、 $S_l=-500$ とし、最も電圧変動の激しかったフィーダ 1 の UV 相の電圧を推定した。ここで、 S_h および S_l は、LRT の長寿命化の観点から、PV の急峻な電圧変動に対して LRT を過度に反応させない値を設定した。今回の設定値は、例えば、6,600V 系統において、10 秒間連続して LRT の不感帯幅を 50V 逸脱した場合に相当する。[500] より値が小さいと、LRT の動作が多く PV システム群の力率制御なしの場合に近い動作となる。一方、[500] より値が大きいと、PV システム群の力率制御量が

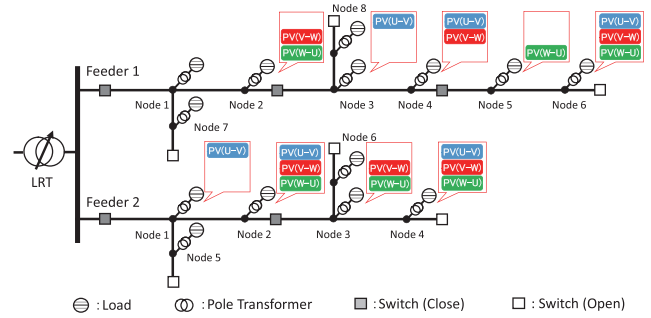


図-6 配電系統モデル

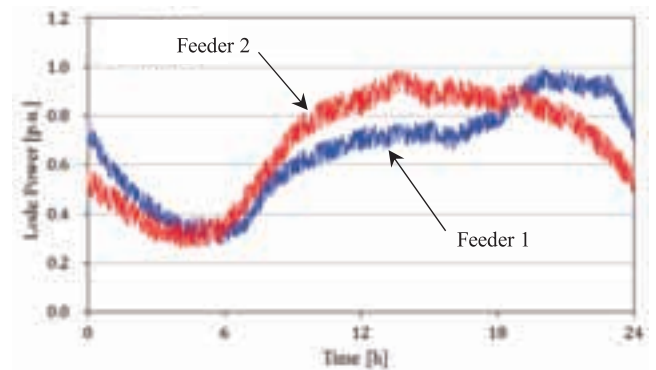


図-7 負荷曲線

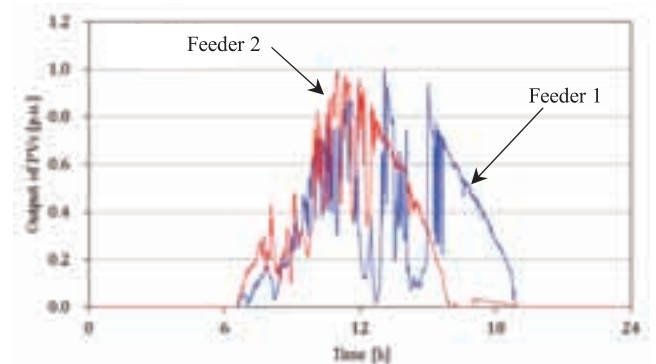


図-8 PV 出力

大きくなり PV 群の有効電力出力が抑えられてしまい、PV システムの有効活用にはなくなってしまう。

図-7 および図-8 に、数値計算に用いた負荷データと PV 出力のプロファイルを示す。図-7 において、各フィーダの総負荷容量をそれぞれの基準容量としている。数値計算は、急峻な PV 出力変動のある実測データを基に、出力変動の激しい時間断面（8:00～17:00）に対して行い、今回、制御周期は 6 秒とした。

3.2 PV システム群の協調制御による電圧逸脱抑制効果の検証

本節では、PV システム群の出力による電圧変動が激しく、それに対する制御効果が大きかったフィーダ 1 に

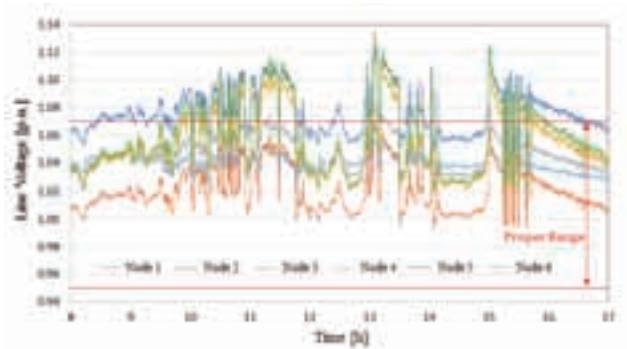


図-9 制御前のフィーダ1, 低圧側 VW 相の線間電圧

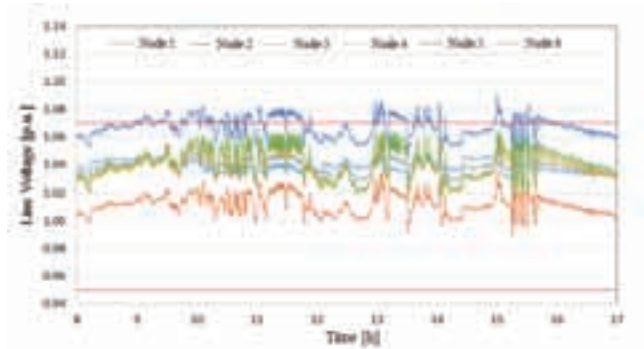
絞って数値計算結果を示し検証を行う。フィーダ2は、PVシステムをフィーダに分散して連系したこと、また、配電線路亘長が短いことにより、フィーダ1に比べて電圧変動が少なく、それに伴い制御効果も少なかったためここでは割愛する。

図-9に、PVシステムの連系率を1とし、力率制御を行わなかった場合の数値計算結果を示す。図は、フィーダ1, 低圧側 VW 相の線間電圧を示している。PVシステムの出力により、PVが集中連系されているフィーダ末端側 (Node3~Node6) の電圧が適正範囲から逸脱していることが確認できる。

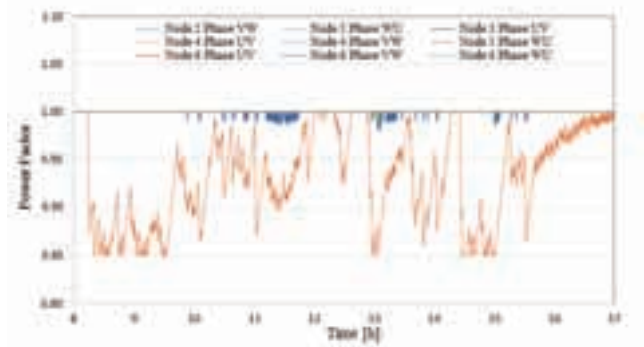
図-10に、従来手法による電圧制御結果と力率の推移を示す。図-10(a)より、PV連系地点 (Node4, Node6) の電圧逸脱は抑制されているが、VW相にPVが連系されていない地点 (Node5) では電圧逸脱は抑制されない。また、図-10(b)より、力率の制御量が各PVシステムでばらつきがあることが分かる。これは、従来手法では、PVの設置箇所によって有効電力を100%近く出力できる箇所と大幅に出力を抑えられてしまう箇所が生じ、需要家間に不公平が生じてしまっていることを示している。

図-11に提案手法① (逸脱相間一括制御) によるPVシステム群の力率制御による電圧制御の結果を示す。図-11(a)より、すべての地点で電圧を適正範囲内に抑制することが出来ていることが分かる。図-11(b)より、力率の制御量は相ごとでばらつきが生じていることが確認できるが、これはPVが連系されていない地点の電圧逸脱を抑制するため、VW相で制御量がなくなったためである。

図-12に提案手法② (逸脱最大ノード一括制御) によるPVシステム群の力率制御による電圧制御の結果を示す。図-12(a)より、すべての地点で電圧を適正範囲内に抑制することが出来ていることが分かる。図-12(b)より、力率の制御量は各PVシステムではほぼ同じ量と

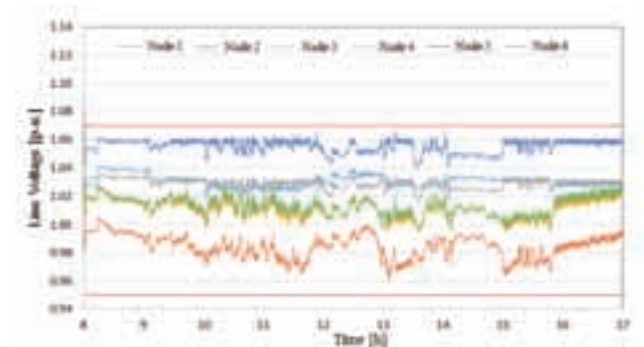


(a) フィーダ1, 低圧側 VW 相の線間電圧

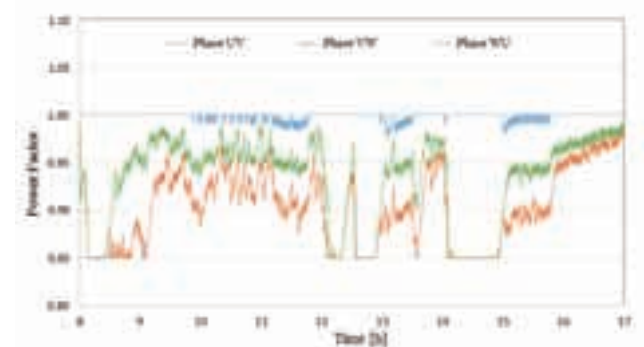


(b) 力率の推移

図-10 従来手法による電圧制御結果

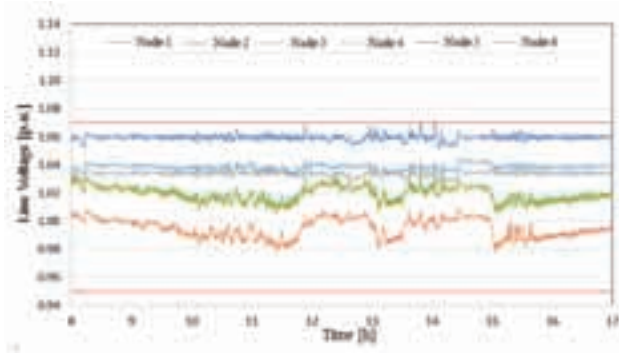


(a) フィーダ1, 低圧側 VW 相の線間電圧

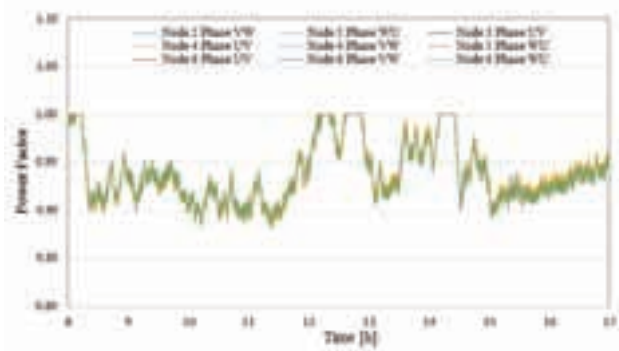


(b) 力率の推移

図-11 提案手法①による電圧制御結果

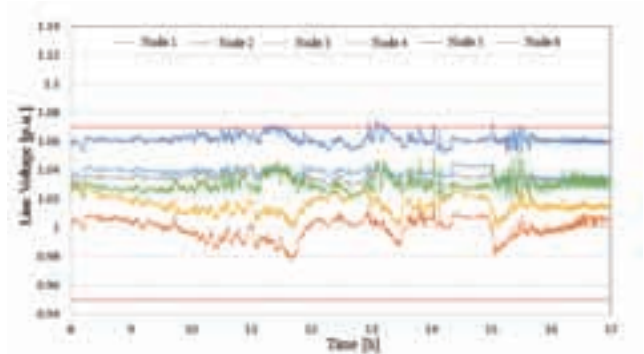


(a) フィーダ 1, 低圧側 VW 相の線間電圧

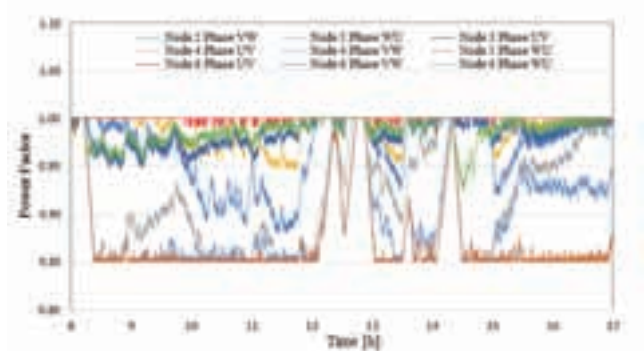


(b) 力率の推移

図-12 提案手法②による電圧制御結果



(a) フィーダ 1, 低圧側 VW 相の線間電圧



(b) 力率の推移

図-13 提案手法③による電圧制御結果

なっている。これは、提案手法②では、電圧逸脱量が最大となったノードに連系されているすべての PV システムを一括して制御していることと、それらの PV システムだけでは抑制しきれずに、フィーダの両端にある PV システムを順々に制御していった結果である。

図-13に提案手法③（逸脱最大ノード相間制御）による PV システム群の力率制御による電圧制御の結果を示す。図-13(a)より、提案手法③では VW 相に PV が連系されていない地点（Node5）の電圧逸脱を抑制することが出来ていない。また、図-13(b)より、力率の制御量は各 PV システムによって大きなばらつきがある。これは、各ノードによって PV が連系されている相の数異なるためである。例えば、Node5では、PV システムが連系されている相は WU 相のみである。そのため、Node5の WU 相の PV システムは常に制御が行われる。一方、Node6では、PV システムが連系されている相は UV 相、VW 相、WU 相全てである。そのため、制御が行われる相が時間によって変わるため、各相の PV システムの制御量は少なくなったと考えられる。

最後に、各制御手法における LRT のタップ切替回数、系統の電圧不平衡率、および PV システム群の有効電力出力を表-1にまとめる。ここでの電圧不平衡率とは、各時間断面（6 秒間隔）の平均値を示している。また、

表-1 各制御手法における LRT のタップ切替回数、系統の電圧不平衡率、PV システム群の有効電力出力

Case	No control	Conventional method	Proposal method①	Proposal method②	Proposal method③
Number of LRT tap changes	29	20	10	2	3
Voltage imbalance factor[%]	1.25	1.20	1.06	1.34	1.19
Active power output[%]	100	96.8	93.1	88.7	88.9

Proposal method ①：逸脱相間一括制御，Proposal method ②：逸脱最大ノード一括制御，Proposal method ③：逸脱最大ノード相間制御

有効電力出力とは、各 PV システムの合計出力を示しており、力率制御を行わなかった場合（連系力率 1）を 100% とする。表-1より、三つの提案手法それぞれで、LRT のタップ切替回数を低減することができている。また、電圧不平衡率は提案手法①を用いると大きく改善することができる。一方で、提案手法②では悪化させてしまっている。このことより、電圧不平衡率の改善には、PV システムの力率制御をノードごとではなく、相ごとに協調して制御を行う方がよい結果が得られると考えられる。PV システムの有効電力出力も 90% 前後得られており、有効電力を最大限利用しつつ電圧制御を行っていることが分かる。約 10% の出力低下となるが、昼間の住宅

地域の負荷は少なく、PV 発電量は多くなるため、出力を多少低下させることは問題ないと考えられる。以上の結果から、PV システム群の有効電力出力および系統の電圧不平衡率を重視する場合は提案手法①を、LRT のタップ切替回数および系統の電圧不平衡率を重視する場合は提案手法③を採用すればよいことが分かる。

4. まとめ

本研究では、今後配電系統に PV システムの連系台数が増大することを見据えた、住宅用 PV システム群の力率制御の協調制御による系統電圧制御手法を提案した。また、提案手法の有用性を検証するため、PV システムの多数台連系による急峻な電圧変動により地点電圧が適正電圧範囲から逸脱してしまうことを想定し、PV システムが多数台連系された配電系統モデルを用いて数値計算を行った。数値計算の結果、複数の PV システムの力率制御を協調して制御を行うことで、電圧制御量を大きくとることができ、従来の制御手法では解消することのできなかった PV 連系地点以外での電圧逸脱を解消することができた。急峻な電圧変動に対して電圧逸脱を抑制でき、また、電圧不平衡率を改善することができ、配電系統における電力品質の向上にも貢献できる結果が得られた。

今後は、PV システム群の協調制御法の改善や、低圧系統を縮小模擬した実験設備を用いた実験による検証を行っていく予定である。提案するシステムは、近年導入が進んでいるスマートメータの活用や機能向上により実現可能と考えるが、今後の課題として、PV システムの連系台数や制御対象の系統規模が大きくなればなるほど通信のタイムラグによる制御遅れが顕著になってくることが考えられるため、制御遅れと制御効果との関係についても解析を行い、実現可能な系統規模について検証する必要がある。

文 献

- 1) 低炭素社会づくり行動計画 (2008)
- 2) 平井崇夫・藤原信行：「新たな電力供給システムの動向と将来展望－2 分散型電源導入拡大に伴う諸問題（配電系統を中心に）」、電学誌, 125 巻, 3 号, pp.149-152 (2005)
- 3) 大城将人・千住智信・與那篤史・浦崎直光・舟橋俊久：「無効電力出力分担を考慮した配電系統の電圧制御法」, 電学論 B, 130 巻, 11 号, pp.972-980 (2010)
- 4) 内山倫行・宮田博昭・伊藤智道・小西博雄：「大規模太陽光発電システムの無効電力制御による電圧変動抑制」, 電学論 B, 130 巻, 3 号, pp.297-304 (2010)
- 5) 石丸雅章・田町英樹・駒見慎太郎：「配電用変圧器のタップ動作を考慮した PV 進相運転による電圧上昇抑制効果」, 電学論 B, Vol.131, No.5, pp.429-436 (2011)
- 6) 川崎章司・金本憲明・田岡久雄・松木純也・林泰弘：「太陽光発電システム群の力率制御と LRT による協調型電圧制御法」, 電学論 B, Vol.132, No.4, pp.309-316 (2012)
- 7) 日本電気協会系統連系専門部会：「系統連系規定 JEAC9701-2012」, 日本電気協会 (2012)